



①9 BUNDESREPUBLIK
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES
PATENTAMT

⑫ Patentschrift
⑩ DE 41 19 396 C 1

⑤1 Int. Cl.⁵:
G 01 F 15/14
G 01 F 1/76
G 01 F 1/84
C 01 B 31/00

②1 Aktenzeichen: P 41 19 396.2-52
②2 Anmeldetag: 12. 6. 91
④3 Offenlegungstag: —
④5 Veröffentlichungstag
der Patenterteilung: 27. 8. 92

DE 41 19 396 C 1

Innerhalb von 3 Monaten nach Veröffentlichung der Erteilung kann Einspruch erhoben werden

⑦3 Patentinhaber:
Wagner, Georg F., 8240 Berchtesgaden, DE

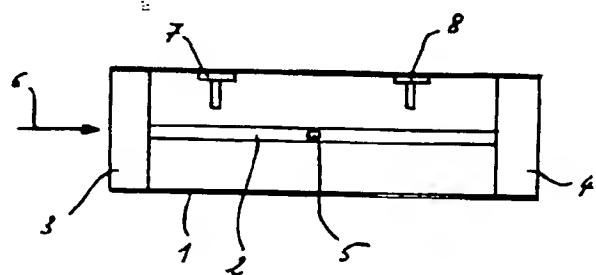
⑦4 Vertreter:
Haft, U., Dipl.-Phys.; Czybulka, U., Dipl.-Phys., 8000
München; Berngruber, O., Dipl.-Chem. Dr.rer.nat.,
Pat.-Anwälte, 8232 Bayerisch Gmain

⑦2 Erfinder:
gleich Patentinhaber

⑤6 Für die Beurteilung der Patentfähigkeit
in Betracht gezogene Druckschriften:
DE 36 32 851 A1
EP 04 21 812 A1
EP 01 71 937 A1
WO 87 11 635 A1
cav 1991, April, S. 54-57;
DE-Z.: Werkstofftech. 15, (1984), S. 331-338;

⑤4 Meßrohr für ein Massendurchfluß-Meßgerät nach dem Coriolis-Prinzip

⑤7 Das Meßrohr (2) eines Massendurchfluß-Meßgerätes
nach dem Coriolis-Prinzip besteht aus durch Pyrolyse un-
schmelzbarer Kunststoffe gewonnenem Kohlenstoff.



DE 41 19 396 C 1

Die Erfindung bezieht sich auf ein Meßrohr für ein Massendurchfluß-Meßgerät nach dem Coriolis-Prinzip.

Die Massedurchflußmessung nach dem Coriolis-Prinzip beruht darauf, daß ein Meßrohr, durch das ein Fluid strömt, durch einen Schwingungsgeber in Schwingung versetzt wird. Durch das im Meßrohr strömende Fluid wird das zum Schwingen angeregte Meßrohr durch die sog. Coriolis-Kräfte verbogen. Die Verbiegung des Meßrohres wird durch Sensoren gemessen. Das Meßergebnis ist ein Maß für den Massendurchfluß bzw. umgerechnet für die Dichte des Fluids, welches das Meßrohr durchströmt. Das Fluid kann dabei eine Flüssigkeit oder ein Gas oder ein Gemisch aus beidem sein. Die Schwingung, mit der das Meßrohr angeregt wird, liegt vorzugsweise im Frequenzbereich der Resonanzfrequenz des Meßrohres. Es sind aber auch andere Frequenzen möglich.

Bei den bekannten Coriolis-Massendurchfluß-Meßgeräten bestehen die Meßrohre aus Metall. Der Innendruck in dem Meßrohr kann dabei 50 bar und mehr betragen. Als Metall wird Edelstahl, Hastelloy oder Titan eingesetzt (DE 36 32 851 A1; EP 04 21 812 A1; cav 1991, April, S. 54 - 57). Ferner sind Tantal, Aluminiumlegierung, Kupferlegierung, Monel-Metall und Nickel-Molybdän-Legierung in Betracht gezogen worden.

Titan hat hervorragende schwingungstechnische Eigenschaften. Auch hat es einen niedrigen Temperaturausdehnungskoeffizienten, was der Nullpunktstabilität des Massendurchfluß-Meßgerätes entgegenkommt. Weiterhin ist Titan beim Einsatz unter oxidierender Atmosphäre gut geeignet, unter reduzierenden Betriebsbedingungen allerdings weniger gut. Ferner läßt die Korrosionsbeständigkeit von Titan gegenüber Säuren zu wünschen übrig. Ein wesentlicher Nachteil von Titan ist jedoch vor allem sein sehr hoher Preis.

Hastelloy und Edelstahl weisen erheblich schlechtere schwingungstechnische Eigenschaften als Titan auf. Darüber hinaus ist Edelstahl gegenüber Chlor-Ionen nicht beständig. Auch weist Edelstahl einen etwa doppelt so hohen Temperaturausdehnungskoeffizienten wie Titan auf, so daß eine aufwendige Software zur Temperaturkompensation erforderlich ist. Weiterhin weisen Hastelloy und Edelstahl eine höhere Dichte als Titan auf, wodurch der Anteil der Rohrmasse erhöht wird. D. h., Meßrohre aus Edelstahl und Hastelloy sprechen viel langsamer an als Titan-Meßrohre. Aluminium besitzt zwar eine niedrige Dichte. Es weist jedoch einen sehr hohen Wärmeausdehnungskoeffizienten, eine niedrige mechanische Bruch- und damit Wechselfestigkeit sowie eine geringe Korrosionsbeständigkeit gegenüber Laugen und eine geringe Abrasionsfestigkeit auf. Damit ist ein hoher Materialabtrag verbunden, der beispielsweise eine ständige Nullpunktdrift bei Verwendung von Aluminium-Meßrohren zur Folge hat. Auch ist Aluminium gegenüber Quecksilber selbst in Spuren außerordentlich korrosionsempfindlich.

Die Nullpunktdrift stellt jedoch nicht nur bei Aluminium-Meßrohren, sondern generell ein großes Problem bei den bekannten Coriolis-Massendurchfluß-Meßgeräten dar, da sie sich schon bei einem Abtrag von wenigen Milligramm bemerkbar macht. Die Folge ist, daß das Gerät entleert und im entleerten Zustand neu kalibriert werden muß.

Ein weiteres Problem der bekannten Coriolis-Massendurchfluß-Meßgeräte bildet die Verbindung des Meßrohres mit dem Anschlußflansch, an dem das Meß-

rohr fest eingespannt wird. Da beispielsweise eine Schraubverbindung des Meßrohres mit dem Anschlußflansch nicht durchführbar ist, weil dies Einkerbungen erfordern würde, die schnell zu Rissen oder Ermüdungsbrüchen des in Schwingung versetzten Meßrohres führen würden, muß das Meßrohr mit dem Anschlußflansch verschweißt werden.

Diese Schweißverbindung muß in einem Schutzgasofen z. B. mit einer speziellen VA-Legierung durchgeführt werden, um eine hinreichende Festigkeit zu erzielen. Allein die Schweißverbindung geht daher mit ca. einem Viertel in die Kosten der bekannten Coriolis-Massendurchfluß-Meßgeräte ein. D. h., die Kosten der Verbindung entsprechen nahezu denen des Meßrohres selbst. Trotz dieses enormen Aufwandes ist die chemische Beständigkeit der Schweißverbindung im allgemeinen geringer als die des Meßrohres, jedenfalls dann, wenn das Meßrohr aus Titan oder Hastelloy besteht.

Nach EP 01 71 937 A1 kann das Meßrohr eines Coriolis-Massendurchfluß-Meßgerätes aus Keramik, Verbundmaterialien und Metall bestehen. Nach WO 89/11 635 A1 besteht es aus Quarz, Glas oder Glas-Keramik.

Keramikwerkstoffe weisen zwar eine Reihe wünschenswerter Eigenschaften, wie hohe Temperaturfestigkeit, mittlere Dichte und große Härte auf, jedoch besitzen sie als Sprödwerkstoffe gegenüber Metallen meist eine erheblich geringere Biegefestigkeit und Berstfähigkeit. Gleiches gilt beispielsweise für Glas.

Kohlenstoff (Graphit) weist eine hohe chemische Beständigkeit bei hoher Temperatur auf. Er wird daher für Schmelzgefäße, Elektroden u. dgl. eingesetzt. Ferner ist sog. glasartiger Kohlenstoff oder Glaskohlenstoff bekannt, der im Gegensatz zu Graphit eine nichtkristalline Kohlenstoffmodifikation darstellt und eine höhere Härte als Graphit besitzt. Glaskohlenstoff wird daher zunehmend anstelle der konventionellen Graphitsorten für Elektroden, Schmelzgefäße und dgl. Geräte in der chemischen Technik und Metallurgie eingesetzt. Ferner wird er im Motoren- und Maschinenbau erprobt (Z. Werkstofftech. 15, S. 331 - 338 (1984)).

Glaskohlenstoff entsteht bei der Pyrolyse unschmelzbarer Kunststoffe, wie Phenolharz, bei denen der thermische Abbau in fester Phase erfolgt.

Ferner ist sog. carbonfaserverstärkter Kohlenstoff (CFC) bekannt, bei dem mit Harz imprägnierte Carbonfasern thermisch gehärtet werden, worauf die ausgehärtete Harzmatrix, also der unschmelzbare Kunststoff, zu Kohlenstoff pyrolysiert wird. Das Einsatzgebiet von carbonfaserverstärktem Kohlenstoff ist im wesentlichen das gleiche wie das von Glaskohlenstoff.

Aufgabe der Erfindung ist es, ein preisgünstiges Meßrohr für ein Coriolis-Massendurchfluß-Meßgerät bereitzustellen, das ohne Einschränkung seiner Einsatzmöglichkeiten einen erfolgreichen Einsatz und problemlosen Betrieb gewährleistet.

Dies wird erfindungsgemäß dadurch erreicht, daß das Meßrohr zumindest teilweise aus durch Pyrolyse unschmelzbarer Kunststoffe gewonnenem Kohlenstoff besteht.

Im allgemeinen besteht das Meßrohr völlig aus einem solchen Kohlenstoff. Jedoch kann das Kohlenstoff-Meßrohr, wie nachstehend näher ausgeführt, auch eine Innenverkleidung und/oder eine Außenummantelung aufweisen. In diesem Fall ist zumindest die tragende Struktur des erfindungsgemäßen Meßrohres aus einem solchen Kohlenstoff gebildet. Weiterhin ist es möglich, den Kohlenstoff mit Füllstoffen zu füllen, beispielsweise mit

Glasteilchen. Darüber hinaus kann das Meßrohr aus mindestens einem solchen Kohlenstoff-Meßrohr-Abchnitt und z. B. mindestens einem Metall-Meßrohr-Abchnitt bestehen.

Der durch Pyrolyse unschmelzbarer Kunststoffe gewonnene Kohlenstoff ist erfindungsgemäß vorzugsweise Glaskohlenstoff. Glaskohlenstoff weist nicht nur einen niedrigen Elastizitätsmodul und damit gute schwingungstechnische Eigenschaften sowie eine hohe chemische Beständigkeit auf, vielmehr weist ein Meßrohr aus Glaskohlenstoff überraschenderweise auch eine hohe mechanische Wechselfestigkeit auf und es hält völlig überraschend auch einem relativ hohen Berstdruck stand. Er besitzt somit völlig unerwartet auch diese für Massendurchfluß-Meßgeräte unverzichtbaren Eigenschaften.

Bei sehr hohem Innendruck im Meßrohr kann es, wie bei Metall-Meßrohren, jedoch erforderlich sein, zusätzliche Maßnahmen gegen ein Bersten der Rohre zu treffen, beispielsweise durch eine Ummantelung des Meßrohres mit einem Kunststoff, wie Polyäthylen.

Das Gehäuse, in dem das Meßrohr schwingt, kann ein massives Stahlrohr sein, um einen Berstschutz zu bilden. Das Gehäuse kann zudem evakuierbar ausgebildet sein, da das Schwingungsverhalten des Meßrohres in einem evakuierten oder mit einem leichteren Gas als Luft, also z. B. mit Helium, gefüllten Gehäuse entscheidend verbessert wird.

Weiterhin können Glaskohlenstoff-Meßrohre mit gut reproduzierbaren Eigenschaften hergestellt werden, was für die Serienfertigung derartiger Meßgeräte von wesentlicher Bedeutung ist. So weist Glaskohlenstoff einen ausgezeichneten Weibull-Modul auf. D. h., der Elastizitätsmodul schwankt bei Meßrohren aus Glaskohlenstoff erheblich weniger als bei Meßrohren aus Metall oder Metalllegierungen von Charge zu Charge. D. h., der Elastizitätsmodul eines Meßrohres aus Glaskohlenstoff ist bei gleichem Herstellverfahren des Rohres als feste Konstante zu betrachten.

Darüber hinaus weist Glaskohlenstoff einen Wärmeausdehnungskoeffizienten auf, der um das Zwei- bis Dreifache geringer ist als beispielsweise von Titan oder Stahl. Demgemäß kann bei einem Massendurchfluß-Meßgerät, das mit dem erfindungsgemäßen Meßrohr versehen ist, auf eine Temperaturkompensationseinrichtung ggf. ganz verzichtet werden. Durch Wegfall der Temperaturkompensation wird die Meßgenauigkeit eines mit dem erfindungsgemäßen Meßrohr ausgerüsteten Coriolis-Masseflußmessers weiter verbessert.

Zugleich zeigt Glaskohlenstoff im Gegensatz zu Metall-Meßrohren praktisch keinerlei Ermüdungsverhalten, also eine extrem hohe mechanische Wechselfestigkeit. D. h., es treten selbst nach jahrelanger Betriebsdauer nicht nur keine Ermüdungsbrüche auf, vielmehr bleiben auch die Schwingungseigenschaften des erfindungsgemäßen Meßrohres absolut konstant, so daß selbst bei sehr langer Betriebsdauer der Nullpunkt des Meßgerätes nicht nachgestellt werden muß.

Ein wesentlicher Vorteil des erfindungsgemäßen Meßrohres gegenüber den bekannten Meßrohren aus Metall, wie Stahl oder Titan, besteht ferner darin, daß Glaskohlenstoff problemlos an dem Anschlußflansch oder sonstigen Anschlußstück des Meßgerätes befestigt werden kann, an dem das Meßrohr mit seinen Enden eingespannt wird. Dazu kann beispielsweise ein herkömmlicher Keramikklebstoff, wie ein Ein- oder Zweikomponenten-Epoxy-Klebstoff verwendet werden. Der Klebstoff muß freilich chemisch beständig sein. Vorteil-

haft ist es ferner, die Klebestelle nach innen und ggfs. auch nach außen mit einem Ring aus einem chemisch resistenten Kunststoff, wie einem Fluorkohlenstoff-Polymeren (z. B. PVFD oder PTFE) abzudichten.

Falls das erfindungsgemäße Meßrohr mit seinen Enden an ein Anschlußstück aus Metall angeklebt wird, kann das Metall ggf. vorher silanisiert werden. Es können auch, wie in der Dentaltechnik üblich, Hochtemperaturreinbrenn- oder Schmelzverbindungen zwischen Glaskohlenstoff und Stahl oder anderen Materialien hergestellt werden.

Darüber hinaus kann das erfindungsgemäße Meßrohr mit einer Einspannvorrichtung am Anschlußstück befestigt werden. Dies gilt insbesondere für schlecht klebbare Anschlußstücke, wie z. B. Anschlußstücke aus Fluorkohlenstoff-Polymeren, wie PVFD oder PTFE.

Wenn auch das Anschlußstück aus Glaskohlenstoff besteht, kann durch vorläufiges Verkleben und anschließendes Erhitzen auf eine entsprechend hohe Temperatur sogar eine einstückige Verbindung zwischen dem Meßrohr und dem Anschlußstück erzielt werden. Der zum vorläufigen Verkleben verwendete Klebstoff wird dabei während des Erhitzens zersetzt und beseitigt. Auf diese Weise können im übrigen auch komplizierteste Meßrohrformen aus Glaskohlenstoff hergestellt werden. Dabei geht man von zwei Halbschalen des Meßrohres aus, die vorläufig verklebt und unter Erhitzen und Klebstoffentfernung nahtlos miteinander versintert werden.

Auch ist die Oberflächenenergie von Glaskohlenstoff und damit der Druckverlust im erfindungsgemäßen Meßrohr niedrig. Demgemäß wird nur ein geringer Vordruck benötigt, d. h. der apparative und Energieaufwand für den Vordruck ist gering. Bei druckempfindlichen Meßstoffen stellt der geringe Vordruck einen weiteren Vorteil des erfindungsgemäßen Meßrohres dar.

Weiterhin weist Glaskohlenstoff eine extrem geringe Gasdurchlässigkeit auf. Das erfindungsgemäße Meßrohr kann deshalb eine sehr geringe Wandstärke aufweisen.

Rohre aus Glaskohlenstoff weisen im allgemeinen eine Wandstärke von 2 bis 4 mm auf. Es hat sich jedoch gezeigt, daß sich die Wandstärke von Glaskohlenstoffrohren durch spanabhebende Bearbeitung, z. B. mit einem Diamantwerkzeug, auf beispielsweise 1 mm reduzieren läßt.

D. h., die im Handel kostengünstig erhältlichen Glaskohlenstoffrohre können — im Gegensatz zu Metallmeßrohren — auf diese Weise mit einer erheblich dünneren Wandstärke hergestellt werden. Damit werden ihre Eigenschaften wesentlich günstiger, da die Masse kleiner und die Steifigkeit geringer wird. Auch kann damit die Wandstärke des Meßrohres entlang desselben gezielt geändert werden, um das Schwingverhalten des Meßrohres zu optimieren. Die erfindungsgemäßen Meßrohre weisen im allgemeinen einen Innendurchmesser von 1 mm bis zu 1", also 25,4 mm auf.

Die bekannten Meßrohre für Coriolis-Massendurchfluß-Meßgeräte weisen die unterschiedlichsten Rohrformen auf, (vgl. cav 1991, April, S. 54 — 57, insbesondere S. 56). So gibt es U- und S-förmige, geradlinige, Omega-förmige Meßrohre oder sog. Exponentialformen, wie "Posthorn"-Konstruktionen u.ä. Glaskohlenstoff muß in einer eigenen Form hergestellt werden. Das gerade Rohr läßt sich daher am einfachsten herstellen. Die anderen Meßrohrformen lassen sich jedoch mit Formen erhalten, mit denen Halbschalen hergestellt werden, die dann, wie oben ausgeführt, einstückig miteinander ver-

bunden werden. Dabei kann die Qualität der inneren Oberfläche des Meßrohres, z. B. auf Lunker und sonstige Fehlstellen, auf einfache Weise überprüft werden, was insbesondere bei komplizierten Meßrohrformen von Vorteil ist.

Das erfindungsgemäße Meßrohr ist vorzugsweise in ein Schutzgehäuse mit einem Überwachungsmechanismus eingebaut. Dazu kann insbesondere ein völlig zugeschweißtes Stahlrohrgehäuse verwendet werden. Damit ist auch eine Explosionsschutz-Version des erfindungsgemäßen Meßrohres möglich. Da Glaskohlenstoff elektrisch leitfähig ist, kann das erfindungsgemäße Rohr geerdet werden, um etwaige elektrostatische Aufladungen abzuleiten. Diese Eigenschaft des erfindungsgemäßen Meßrohres ist insbesondere bei entflammaren oder explosionsgefährdeten Fluiden von Bedeutung.

Wie erwähnt, ist Glaskohlenstoff gegenüber praktisch allen chemischen Stoffen beständig. Auch weist er eine extrem hohe Abriebfestigkeit auf. Damit tritt bei dem erfindungsgemäßen Rohr auch nach längerer Betriebsdauer praktisch kein Materialabtrag auf, so daß sich keine Nullpunkt drift des Massendurchfluß-Meßgerätes ergibt.

Falls ganz spezielle Meßstoffe, beispielsweise Klebstoffe, wie Cyanoacrylat-Klebstoff gemessen werden sollen, kann es jedoch erforderlich sein, das Meßrohr mit einer Innenauskleidung, beispielsweise mit einer Auskleidung aus einem Fluorkohlenstoff- oder einem Fluorkohlenwasserstoff-Polymeren oder Polyäthylen zu versehen. Der Vorteil der hohen Abriebfestigkeit von Glaskohlenstoff geht dadurch allerdings verloren.

Neben Glaskohlenstoff kann erfindungsgemäß carbonfaserverstärkter Kohlenstoff eingesetzt werden, der in bezug auf das erfindungsgemäße Meßrohr im wesentlichen die gleichen Eigenschaften wie Glaskohlenstoff aufweist. Auch kann das erfindungsgemäße Meßrohr aus einem Glaskohlenstoff bestehen, der beispielsweise mit Glasteilchen gefüllt ist. Durch die Füllung kann der Elastizitätsmodul entlang des Meßrohres kontinuierlich oder sprunghaft gezielt geändert werden. Dies ist insbesondere bei Kleinstbau-Schwingern von Bedeutung.

Nachstehend ist eine Ausführungsform eines erfindungsgemäßen Meßrohres anhand der Zeichnung beispielsweise näher erläutert, deren einzige Figur in vereinfachter Wiedergabe einen Längsschnitt durch ein Coriolis-Massendurchfluß-Meßgerät zeigt.

Danach ist in einem Gehäuse 1 ein Meßrohr 2 zwischen zwei Anschlußstücken 3 und 4 fest eingespannt. Das Meßrohr 2 besteht aus Glaskohlenstoff. Das Meßrohr 2 wird in einer Ebene, die senkrecht zur Zeichenebene steht, durch einen Schwingungsgeber in Schwingung versetzt, beispielsweise mit einer Frequenz von 50 bis 1000 Hertz. Der Schwingungsgeber kann durch einen am Meßrohr 2 befestigten Permanentmagneten 5 gebildet sein, der in eine nicht dargestellte am Gehäuse 1 befestigte Spule hineinragt.

Wenn beispielsweise eine Flüssigkeit entsprechend dem Pfeil 6 von dem Anschlußstück 3 durch das Meßrohr 2 zu dem Anschlußstück 4 strömt, verändert sich der Impuls durch die Richtungsänderung des Geschwindigkeitsvektors, d. h., die Flüssigkeit muß der sich ändernden räumlichen Lage des Meßrohres 2 folgen. Um diese Impulsänderung herbeizuführen, übt das Meßrohr 2 auf die Flüssigkeit eine zusätzliche Kraftkomponente, die Coriolis-Kraft, aus. Dabei wirkt die Flüssigkeit ihrerseits wiederum auf das Meßrohr 2 zurück. Diese Reaktion der Flüssigkeit beeinflusst den Schwingungszustand des Meßrohres 2. Der Schwingungszustand des Meß-

rohres 2 ist nicht synchron, d. h., zwei verschiedene Punkte entlang des Meßrohres 2 schwingen mit einer gewissen Zeitverzögerung zueinander. An diesen beiden Punkten sind berührungslos arbeitende Schwingungssensoren 7 und 8, beispielsweise optische Abtaster, angebracht, mit denen die Verbiegung des Meßrohres 2 durch die Flüssigkeit erfaßt wird. Die Phasendifferenz der Schwingungszustände des Meßrohres 2 ist proportional zum Massedurchfluß.

Patentansprüche

1. Meßrohr für ein Massendurchfluß-Meßgerät nach dem Coriolis-Prinzip, **dadurch gekennzeichnet**, daß es zumindest teilweise aus durch Pyrolyse unschmelzbarer Kunststoffe gewonnenem Kohlenstoff besteht.
2. Meßrohr nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet**, daß zumindest die tragende Struktur des Meßrohres (2) aus durch Pyrolyse unschmelzbarer Kunststoffe gewonnenem Kohlenstoff besteht.
3. Meßrohr nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß der durch Pyrolyse gewonnene Kohlenstoff Glaskohlenstoff ist.
4. Meßrohr nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet**, daß der Glaskohlenstoff mit einem Füllstoff gefüllt ist.
5. Meßrohr nach Anspruch 1 oder 2, **dadurch gekennzeichnet**, daß der durch Pyrolyse gewonnene Kohlenstoff carbonfaserverstärkter Kohlenstoff ist.
6. Meßrohr nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, daß sich die Wandstärke entlang des Meßrohres (2) ändert.
7. Meßrohr nach einem der vorstehenden Ansprüche, **dadurch gekennzeichnet**, daß sich der Elastizitätsmodul entlang des Meßrohres (2) ändert.

Hierzu 1 Seite(n) Zeichnungen

— Leerseite —

